

УДК 533.6:629.7

© Е.Л. Токарева

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СВОЙСТВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ ОХЛАЖДАЮЩИХ ТРАКТАХ С ПЕРЕМЕННОЙ МАССОЙ ОХЛАДИТЕЛЯ

Описан программный инструмент для представления теплофизических свойств теплоносителя при численном моделировании гидродинамики и тепломассообмена в теплонапряженных охлаждающих трактах с переменной массой охладителя и приведены результаты для некоторых свойств азотного тетраоксида.

Описано програмний інструмент для подання теплофізичних властивостей теплоносія при чисельному моделюванні гідродинаміки та тепломасообміну в теплонапружених охолоджуючих трактах зі змінною масою охолоджувача та наведено результати для деяких властивостей азотного тетраоксида.

A technique for presentation of the thermophysical properties of the heat carrier in the numerical modeling of fluid flow and heat and mass transfer in thermally cooling channels with variable mass refrigerant and results for certain properties of the nitrogen tetroxide.

Введение. Численное моделирование гидродинамики и тепломассообмена в теплонапряженных конструкциях предполагает использование большого массива данных, характеризующих теплофизические свойства теплоносителей в рабочем диапазоне температур и давлений. При моделировании течения в теплонапряженных охлаждающих трактах с переменной массой охладителя необходимо иметь данные о свойствах теплоносителя в разных агрегатных состояниях и на линии насыщения. Задание исходных данных существенно влияет на результат численных исследований, поэтому достоверность и объем этих данных приобретают исключительную важность.

Теплофизические свойства веществ, чаще всего, представлены в виде табличных зависимостей от одного (температура или давление) или двух (температура и давление) параметров. Основные задачи заключаются в подборе аналитических зависимостей, способных описывать табличные данные с удовлетворительной точностью, и определении параметров этих аппроксимирующих зависимостей. Согласованность аппроксимирующих функций для зависимостей конкретного свойства вещества в разных агрегатных состояниях необходима для правильного моделирования процессов в пограничной области и состыковка таких данных, взятых из различных источников, приобретает особую актуальность.

При создании многофункциональных программ численного расчета большое значение имеет возможность интегрирования программных средств в общий пакет программ, поэтому разработка программ обработки и представления информации о теплофизических свойствах теплоносителей является одним из основных направлений при разработке методического и программного обеспечения для численного расчета.

Цель исследований. В пакете программ численного моделирования гидродинамики и тепломассообмена в теплонапряженных охлаждающих трактах с переменной массой охладителя для описания свойств веществ используются аналитические зависимости. Такой подход способствует сжатию и, там где необходимо, сглаживанию данных. Он также позволяет применять аналитическое дифференцирование. Используемые аналитические аппроксимационные формулы могут быть общего или специального вида. Для подбора аппроксимирующих табличные данные формул и определения их коэффициентов используется специально разработанный программный инструмент.

Изложение основного материала. В основе методики аппроксимации лежит метод Пауэлла сопряженных направлений без вычисления производных [1]. Программная реализация методики предусматривает возможность вычисление минимизируемой функции (одной из норм невязки) и одномерный поиск минимума по методу золотого сечения.

Для оценки вычислений может быть выбрана:

- квадратичная норма невязки аппроксимации:

$$f_1 = \sum_{i=0}^{N-1} [y_i - F(x_i, p)]^2 + f_P,$$

где $y_i, i = 0, \dots, N-1$ – значения аппроксимируемой величины, $F(\mathbf{x}_i, \mathbf{p})$ – значение аппроксимирующей функции с i -м вектором независимых переменных \mathbf{x}_i и текущим вектором параметров \mathbf{p} , f_P – штраф, который может вычисляться при первом обращении к функции F с обновленным вектором \mathbf{p} с целью неявного задания некоторых условий;

- квадратичная взвешенная норма невязки аппроксимации

$$f_1 = \sum_{i=0}^{N-1} w_i [y_i - F(x_i, p)]^2 + f_P,$$

с задаваемыми весами $w_i, i = 0, \dots, N-1$;

- квадратичная норма относительной невязки аппроксимации

$$f_1 = \sum_{i=0}^{N-1} \left[\frac{y_i - F(x_i, p)}{y_i^*} \right]^2 + f_P,$$

где $y_i^* = \max\{|y_i|, \varepsilon_y\}$, ε_y – допуск на минимальное абсолютное значение y ;

- взвешенная квадратичная норма относительной невязки аппроксимации

$$f_1 = \sum_{i=0}^{N-1} w_i \left[\frac{y_i - F(x_i, p)}{y_i^*} \right]^2 + f_P$$

- абсолютная норма невязки аппроксимации

$$f_1 = \sum_{i=0}^{N-1} |y_i - F(\mathbf{x}_i, \mathbf{p})| + f_P,$$

соответствующая методу наименьших модулей;

- абсолютная норма относительной невязки аппроксимации

$$f_1 = \sum_{i=0}^{N-1} \left| \frac{y_i - F(x_i, p)}{y_i^*} \right| + f_P.$$

Программа позволяет преобразовывать исходные данные перед аппроксимацией с целью перехода к новым единицам измерения или к безразмерным величинам, использования более простой аппроксимирующей функции и в итоге сокращения объема вычислений при обращении к функции и ускорения сходимости алгоритма. Для этого используются целый ряд predetermined и зарегистрированных в виде отдельных программных блоков функций преобразования исходных данных.

Аппроксимирующая функция также может выбираться из написанных ранее и зарегистрированных функций или специально пишется для обрабатываемого набора данных. В число predetermined функций входит ряд широко используемых для аппроксимации данных зависимостей.

В качестве примера специализированных функций приведена полученная с использованием разработанного программного инструмента функциональная зависимость для давления насыщенных паров охладителя N_2O_4 :

$$\bar{p} = P(\bar{T}) + 0,736510 \bar{T}^Q(\bar{T}),$$

где

$$P(\bar{T}) = ((0,186190\bar{T} + 0,0750474)\bar{T} + 0,0193452)\bar{T} + 0,00189253,$$

$$Q(\bar{T}) = (-0,930281\bar{T} + 1,5999)\bar{T} + 3,98639,$$

$$\bar{p} = p / p_{кр},$$

$$\bar{T} = (T - T_{пл}) / (T_{кр} - T_{пл}).$$

Полученная зависимость обеспечивает почти во всем диапазоне рабочих температур от температуры плавления $T_{пл} \sim 261$ К до критической температуры $T_{кр} \sim 431$ К точность порядка 0,2%, за исключением небольшой околочритической области параметров, где точность изменяется от 0,44% при $T = 420$ К до 1,8 % при $T_{кр} = 431$ К.

Многопараметрические зависимости свойств веществ, в основном, представлены в виде таблиц по одному из параметров (назовем этот параметр первичным; как правило, это температура) при ряде фиксированных значений остальных, вторичных (например, давления). Начальный этап обработки заключается в выборе как можно меньшего числа типов зависимостей от первичного параметра, хорошо аппроксимирующих данные во всех таблицах для данного свойства. Далее находятся коэффициенты аппроксимирующих зависимостей для каждой таблицы. Обычно количество этих коэффициентов, как и число табличных значений вторичного параметра, невелико, и для вычисления искомого свойства наиболее удобной может оказаться процедура, сочетающая функциональную аппроксимацию по первичному параметру с интерполяцией по вторичному.

Более последовательный подход, который применен в реализованной методике, состоит в исследовании и последующей функциональной аппроксимации зависимости каждого из коэффициентов от вторичных параметров. При этом, поскольку используются функции более общего вида, чем необходимо для каждой из таблиц в отдельности, часто обнаруживается взаимозависимость некоторых коэффициентов, которая хорошо видна при варьировании одного из них в окрестности оптимального значения. Такая взаимозависимость может проявляться лишь в некотором поддиапазоне изменения вторичного параметра и, в принципе, удобна для описания зависимостей коэффициентов от вторичного параметра, поскольку при сглаживании данных в упомянутом поддиапазоне получаются субоптимальные решения, не намного худшие, чем оптимальное. С учетом сказанного аппроксимацию коэффициентов надо производить последовательно, уточняя значения оставшихся.

В случаях нестыковки данных из различных источников производится искусственная состыковка отдельно построенных зависимостей за счет ухудшения аппроксимации в окрестности границы. Отметим, что использование этого приема для хорошо согласующихся данных также вполне приемлемо и не приводит к заметному снижению качества аппроксимации вблизи границы.

Рассмотрим методику стыковки данных на примере параметра, описанного функцией $f(T, p)$ двух переменных – отнесенных к критическим значениям температуры T и давления p . Пусть известны зависимость $T_S(p)$ температуры от давления на линии насыщения и зависимость параметра от давления насыщенных паров $f_S(p)$ (здесь и далее подразумеваются относительные температура и давление). Для плавного перехода от данных на границе к данным внутри области определения функции $f(T, p)$ можно использовать при $p < 1$ вспомогательную функцию общего вида

$$f^*(T, p) = f(T, p) + [f_S - f(T_S, p)]\varphi(T - T_S),$$

где значения f_S и T_S определены при давлении p , а весовая функция $\varphi(x)$, такая что $\varphi(0) = 1$, быстро стремится к нулю с ростом x . В качестве функции φ можно предложить такие зависимости, как

$$\varphi(x) = \begin{cases} \left(1 - \frac{x}{T^* - T_S}\right)^m, & T < T^*; \\ 0, & T \geq T^*, \end{cases} \quad \varphi(x) = \exp\left(-\frac{kx}{T^* - T_S}\right), \quad T^* > T_S.$$

Значения параметров T^* , m , k подбираются эмпирически.

Более надежный, хотя и дающий менее гладкое сопряжение данных, способ – это линейная интерполяция между данными на границе и в некоторой точке внутри области определения описываемого свойства

$$f^*(T, p) = \begin{cases} f_S + [f(kT_S, p) - f_S] \frac{T - T_S}{(k - 1)T_S}, & T < kT_S; \\ f(T, p), & T \geq kT_S. \end{cases}$$

Коэффициент $k > 1$ выбирается из условия лучшей аппроксимации переходной области и может быть функцией давления или T_S .

Ниже приведены графические зависимости газовой постоянной паров N_2O_4 от давления и температуры, построенные по табличным данным, а также полученные с использованием разработанного инструмента соответствующие аналитические зависимости.

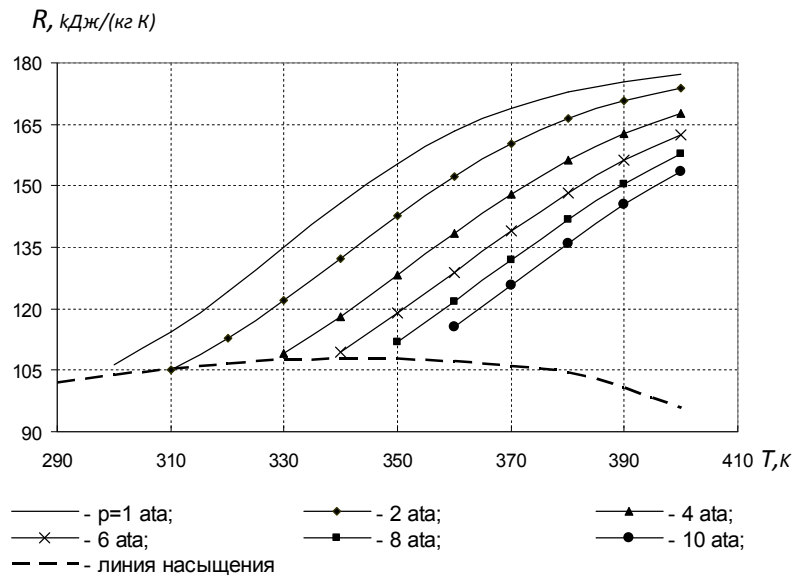


Рис. 1. Графики зависимости газовой постоянной N_2O_4 от давления и температуры

Аппроксимирующая функция имеет вид при $\bar{T} > 0$

$$R = R_s + R_1(\bar{T}) + R_2(\bar{T}),$$

где

$$R_2(\bar{T}) = R'_s T_{кр} (e^{-f_1 \bar{T} / 0,120721} - e^{-10 \bar{T}}) / 10,$$

$$f_1 = (\bar{T} / 0,120721)^{f_2 - 1};$$

$$f_2 = 3,50982 - 2,7909 T_s / T_{кр};$$

R_s и R'_s – значения газовой постоянной и ее производной на линии насыщения, соответственно;

$$\bar{T} = (T - T_s) / T_{кр}.$$

Для $\bar{T} < 0$ или $\bar{T} = 0$ принимается $R = R_s$.

Программа аппроксимации свойств теплоносителей предполагает протоколирование изменения коэффициентов получаемых зависимостей, а также графическое представление как самих аппроксимирующих формул, так и аналитических формул для первых (а в некоторых случаях и для вторых) производных.

Кроме построения графиков пользовательский интерфейс позволяет:

- читать, просматривать, редактировать и записывать файлы исходных данных;
- просматривать списки имеющихся аппроксимирующих функций и процедур, используемых для предварительного преобразования данных;

- запускать процесс решения задачи минимизации;
- просматривать результаты решения в виде текста.

Выводы. В составе пакета программ численного моделирования процессов гидродинамики и теплообмена в теплонапряженных охлаждающих трактах с переменной массой охладителя разработан программный инструмент для обработки и представления информации о термодинамических и теплофизических свойствах теплоносителей и материалов. Разработанная методика и ее программная реализация позволяют получать аналитические формулы, с удовлетворительной точностью аппроксимирующие табличные данные от нескольких параметров. Разработанный программный инструмент может использоваться автономно при решении подобного рода задач в любой области.

Список литературы

1. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 536 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Мецераковим Л.І.
Надійшла до редакції 11.11.13*

УДК 519.6:504.3.054

© Н.Н. Беляев, Д.О. Затынайченко

АНАЛИЗ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА В ПОМЕЩЕНИИ НА БАЗЕ CFD МОДЕЛИ

Разработана численная модель для моделирования распространения ионов в помещении. Модель базируется на уравнении потенциального течения и уравнении массопереноса. Приводятся результаты вычислительного эксперимента.

Розроблено чисельну модель для моделювання поширення іонів в приміщенні. Модель базується на рівнянні потенціальної течії та рівнянні масопереносу. Наводяться результати обчислювального експерименту.

A numerical model was developed to simulate the air ions dispersion in the rooms. The model is based on the equation of the potential flow and equation of the mass transfer. The results of the numerical experiments are presented.

Вступление. Как известно, для обеспечения нормального микроклимата на рабочих местах необходимо, чтобы в рабочих зонах была определенная концентрация аэроионов [1,2,4,5]. Поэтому необходимо заранее уметь предопределять концентрацию аэроионов как во всем помещении, так и в рабочих зонах, с целью обеспечения требуемых параметров микроклимата. Решение данной задачи может быть найдено с помощью метода математического моделирования. Для практики важно иметь математические модели, позволяющие прогнозировать аэроионный режим (АР) в помещениях с учетом основных физических факторов, влияющих на процесс рассеивания аэроионов в помещении.